

PRISTUP ODREĐIVANJU ZAVARLJIVOSTI ČELIKA

APPROACH TO DETERMINING WELDABILITY OF STEEL

Marko Dunder, Goran Salopek, Marko Horvat, Veljko Kondić, Matija Marković

Stručni članak

Sažetak: U radu su prikazani čimbenici koji utječu na zavarljivost, s posebnim osvrtom na zavarljivost mikrolegiranih čelika i čelika za poboljšavanje. Provedena su ispitivanja simulacijom toplinskog zavarivačkog ciklusa na simulatoru tipa Smitweld TCS 1405, te metodama Implant i Tekken u svrhu utvrđivanja sklonosti mikrolegiranih i poboljšanih čelika hladnim pukotinama. Na koncu su predloženi parametri zavarivanja koji pretpostavljaju zavareni spoj bez hladnih pukotina.

Ključne riječi: zavarljivost, hladne pukotine, Implant metoda, Tekken metoda, mikrolegirani čelici, čelici za poboljšavanje

Professional paper

Abstract: The paper presents the factors that affect weldability, with special reference to the weldability of micro-alloyed and quenched and tempered steel. Tests were carried out by simulating the weld thermal cycle simulator type Smitweld TCS 1405, and methods of Implant and Tekken for the purpose of determining the propensity of micro-alloyed and quenched and tempered steel cold cracking. At the end of the proposed welding parameters which assume welding connection without cold cracks.

Key words: weldability, cold cracks, implant method, Tekken method, fine grain structural steel, steels for structural improvement quenching

1. UVOD

Zavarljivost je sposobnost zavarivanja materijala. Metal smatramo zavarljivim onda kada primjenjujući određeni postupak zavarivanja, dobivamo kontinuirani, homogeni zavareni spoj koji zadovoljava predviđene zahtjeve i koji ima zahtijevana mehanička i druga potrebna svojstva. Zavarljivost je komparativno svojstvo (uspoređuje se zavarljivost dva ili više materijala uz primjenu iste ili različitih tehnologija zavarivanja). Ocjena zavarljivosti najčešće je kvalitativna (zadovoljavajuća / ne zadovoljavajuća), ali može biti i kvantitativna.

To je kompleksan pojam pod kojim se podrazumijeva međuzavisnost materijala, konstrukcije i tehnologije. Tako DIN 8528 [1] prikazuje zavarljivost nekog konstrukcijskog elementa kroz utjecaj materijala, preko sposobnosti zavarivanja konstrukcije, do sigurnosti zavarene konstrukcije i mogućnosti zavarivanja. Prema standardu ISO 581, metale se smatra zavarljive u određenom stupnju, određenim načinom zavarivanja i za zadanu svrhu ako se može postići homogenost zavarenog spoja pri uporabi pogodnog postupka zavarivanja, tako da spoj odgovara zahtjevima njihovih lokalnih svojstava i njihova utjecaja na konstrukciju.

Kvaliteta zavarenog spoja može se izraziti usporedbom svojstava osnovnog materijala i zavarenog spoja. Redovito dolazi do razlike u svojstvima osnovnog

materijala i zavarenog spoja, i ona je to veća što je zavarljivost, kao kompleksna veličina, manja. Stoga je jedan od mogućih kriterija za definiranje zavarljivosti veličina navedene razlike svojstava [2].

2. UTJECAJNE VELIČINE NA ZAVARLJIVOST

Elementi zavarljivosti relevantne su pojave u zavarenom spoju koje najčešće nastaju u trenu njegova formiranja ili tijekom eksploatiranja i predstavljaju čimbenike kojima se može definirati zavarljivost kao kompleksna veličina.

Najznačajniji utjecaj na zavarljivost ima materijal, kako njegov nominalni kemijski sastav, također, ali u manjoj mjeri, primjese, veličina zrna, vrsta primijenjene prethodne toplinske obrade, stanje izrade, veličina i oblik komada i konstrukcije. Korelaciju kemijskog sastava, prvenstveno sadržaja ugljika, i zavarljivosti, može se izraziti jednadžbama za ekvivalentni ugljik kao i parametarskim jednadžbama.

Uobičajeno je da je čelik s oko 0,25% C na granici dobre zavarljivosti i što je sadržaj ugljika u čeliku veći, zavarljivost se smanjuje, ali pri tom se ne može govoriti o linearnoj zavisnosti.

Ugljik je svakako element s kojim se mora računati, za razliku od fosfora, sumpora i dr. kojih se razina nastoji smanjiti tehnološkim postupkom prerade čelika. U istom

smislu je i utjecaj plinova, posebice vodika, koji je direktni uzročnik nastanka hladnih pukotina.

Utjecaj vodika značajan je te u okviru određenih metoda ispitivanja zavarljivosti treba odrediti njegov sadržaj u uzorcima.

Izrada i konstrukcija, kao utjecajne veličine na zavarljivost, dolaze do izražaja pri formiranju konkretne zavarene konstrukcije [3].

Zavarljivost se nedvojbeno smanjuje povećanjem debljine osnovnog materijala i složenosti konstrukcije. Zaključujući o utjecajnim veličinama na zavarljivost, može se konstatirati da ih ima mnogo, što i jest razlog nepostojanja jedinstvena pristupa problemu definiranja zavarljivosti.

Istraživanja zavarljivosti obuhvaćaju čitav niz aktivnosti nužnih za dobivanje kvalitetne tehnologije zavarivanja koja je osnova za dobivanje kvalitetnog zavarenog spoja u proizvodnji, koji će biti pouzdan u predviđenim uvjetima i vijeku eksploataciji. Osnovne aktivnosti ispitivanja zavarljivosti odnose se na ispitivanja sklonosti različitim vrstama pukotina (hladne, tople, lamelarno odvajanje / cijepanje, pukotine uslijed naknadnog/ponovnog zagrijavanja), transformacijskom otvrdnjavanju, smanjenju žilavosti (sniženje prijelazne temperature iz žilavog u krhko stanje) i dr.

3. ISPITIVANJE ZAVARLJIVOSTI PROVEDENO ISPITIVANJEM SKLONOSTI HLADNIM PUKOTINAMA

Metode ispitivanja sklonosti hladnim pukotinama mogu se podijeliti na direktne i indirektne. Direktne su metode one koje se provode na uzorcima zavarenih spojeva i/ili zavarenim spojevima na zavarenoj konstrukciji, dok se indirektne metode temelje na različitim eksperimentalno dobivenim jednadžbama za procjenu utjecaja raznih čimbenika na pojavu pukotine. Direktna ispitivanja mogu se podijeliti u tri skupine [4]:

1. Ispitivanje simuliranjem ciklusa zavarivanja (npr. ispitivanje na Smitweld, Gleeble i Thermorestor uređaju).
2. Ispitivanje sa stvarnim zavarivanjem uz vlastitu krutost (Tekken, Lehigh, CTS, probe s kružnim zarezom RD) i probe s prisilnom krutošću (s vanjskim dodatnim opterećenjem, npr. TRC, RRC i dr.) i
3. Ispitivanje s realnim ciklusom ili uložnim uzorkom (umetkom ili implantom).

Kriterij ocjene sklonosti hladnim pukotinama može biti:

- kvalitativan, odnosno nakon istraživanja zavarljivosti donosi se zaključak da je materijal "sklon" ili "nije sklon" prema hladnim pukotinama,
- kvantitativan, ako se može numerički iskazati neka od relevantnih veličina (npr. maksimalna naprezanja pri kojima ne dolazi do nastajanja hladnih pukotina kod Implant metode).

3.1. Simuliranje toplinskog zavarivačkog ciklusa

Ispitivanja na simulatoru toplinskog ciklusa omogućavaju kompleksno utvrđivanje sklonosti

materijala nastanku pukotina. Kod pojedinih laboratorijskih metoda koje zahtijevaju zavarivanje realnih uzoraka, različitih oblika i dimenzija, jasno se utvrđuje djelovanje pojedinačnog utjecajnog faktora na zavarljivost. Ovakve metode daju informaciju o određenoj vrsti pukotine i za ispitivanje zavarljivosti mora se primijeniti više metoda.

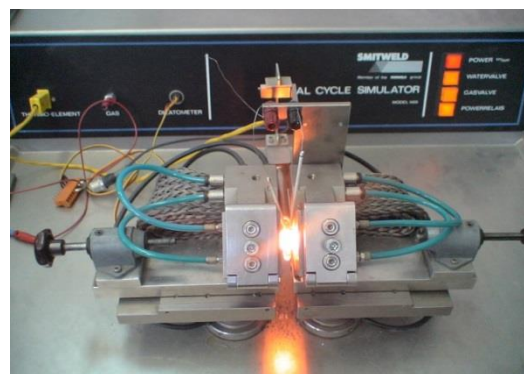
Simulacija toplinskog ciklusa zavarivanja omogućava dobivanje diferencirane ocjene utjecaja pojedinih faktora na nastanak pukotine. Simulacija zavarivačkih ciklusa se posljednjih godina upotrebljava pri istraživanju zavarljivosti, što uključuje ispitivanje prisutnosti različitih vrsta mikrostruktura i detaljno istraživanje zone utjecaja topline (ZUT-a), koja je sa stajališta mikrostrukture izrazito heterogeni dio zavarenog spoja.

Pri istraživanju ZUT-a realnih zavarenih spojeva, često nije moguće pripremiti odgovarajuće epruvete radi veoma uskog ZUT-a, a samim tim i pojedinih uskih područja unutar ZUT-a. Za ispitivanje zavarljivosti mikrolegiranog čelika povišene čvrstoće TStE 420 i poboljšanog visokočvrstog čelika S960QL izabrana je navedena metoda.

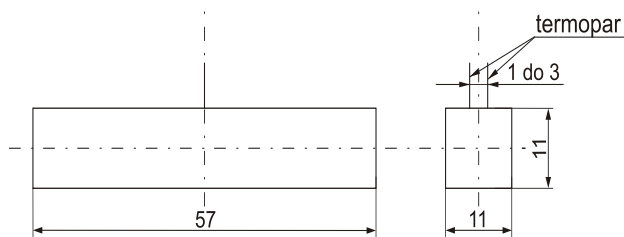
Pri simuliranju toplinskih zavarivačkih ciklusa pojedine mikrostrukture se "sintetički" stvaraju. Tako se ostvaruju povoljni uvjeti za razjašnjenje znatnog broja pitanja koja su u svezi s ponašanjem osnovnog materijala u uvjetima toplinskih zavarivačkih ciklusa. Simulacijom toplinskog ciklusa zavarivanja mogu se ostvariti dovoljno široka područja homogenih i ponovljivih mikrostruktura, tako da se za ispitivanje mehaničkih svojstava mogu upotrebljavati klasični postupci ispitivanja [5].

Podobnost za zavarivanje obuhvaća više odvojenih, neovisnih svojstava i ponašanja materijala prilikom zavarivanja. Najznačajnija svojstva su čvrstoća i žilavost kao ponašanje s obzirom na stvaranje pukotina u spoju. Budući da ovi zahtjevi ovise od konstruktivnog oblikovanja i planiranih uvjeta eksploatacije objekta, i zahtjevi se mijenjaju kod svake nove konstrukcije. Zbog toga nije moguće označiti podobnost za zavarivanje jednim brojem, već se svako područje svojstava kojima se teži mora uzeti posebno u obzir, kod ocjenjivanja i prosuđivanja podobnosti za zavarivanje pojedinog materijala.

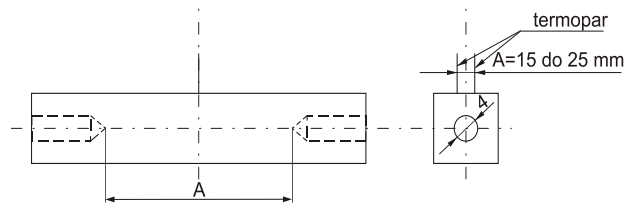
Uređaj za ispitivanje zavarljivosti simulacijom toplinskog zavarivačkog ciklusa prikazan je na slici 1, a uzorci za simulaciju na slici 2 i 3 [5].



Slika 1. Simulator toplinskog ciklusa Smitweld TCS 1405 tijekom simulacije toplinskog ciklusa zavarivanja



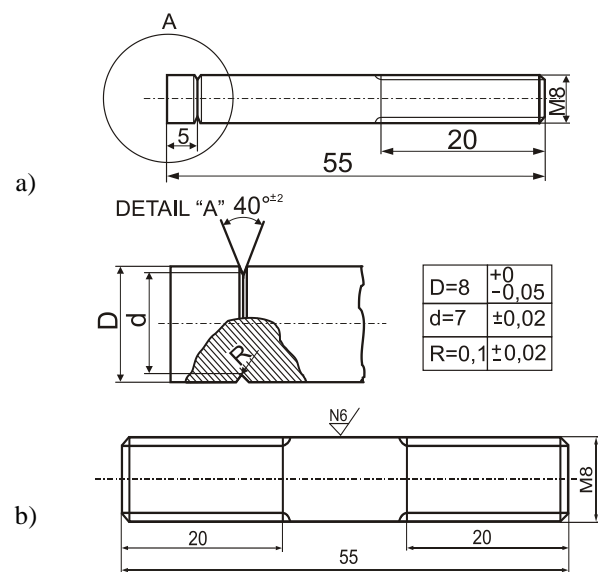
Slika 2. Uzorak za simuliranje toplinskog ciklusa s termo parom (indirektno hlađenje)



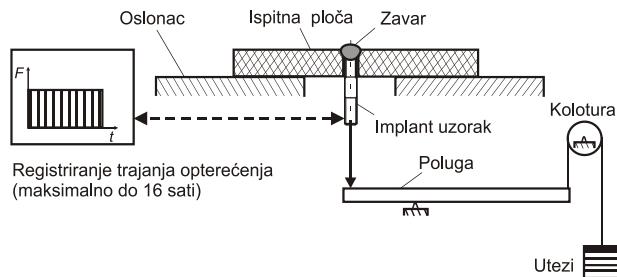
Slika 3. Uzorak za simuliranje toplinskog ciklusa s termo parom (indirektno i direktno hlađenje)

3.2. Ispitivanja zavarljivosti (sklonosti hladnim pukotinama) Implant metodom

Ispitivanje zavarljivosti ovom metodom zasniva se na promjeni utjecajnih čimbenika, kao što su: dodatni materijal, zarivački toplinski ciklus, temperatura predgrijavanja, udjel difundiranog vodika, naprezanje i dr., kao i sagledavanje njihova utjecaja na nastanak hladnih pukotina. Primjenjujući ovu metodu možemo dobiti kvantitativne podatke o kritičnom naprezanju loma (R_{kr}) Imp.. To je najviše naprezanje kod kojeg u zavarenom spoju još ne nastaju hladne pukotine, a uspoređujemo ga s granicom plastičnosti osnovnog materijala. Pri ovom ispitivanju upotrebljava se strojno obrađeni cilindrični umetak iz čelika koji treba ispitivati, prikazan na slici 4. Takav umetak se umetne u kalibriranu rupu izbušenu u potpornoj ploči, tako da je zarezani kraj u ravnini s površinom ploče. Na slici 5. prikazana je skica implant uzorka i potporne ploče [6].



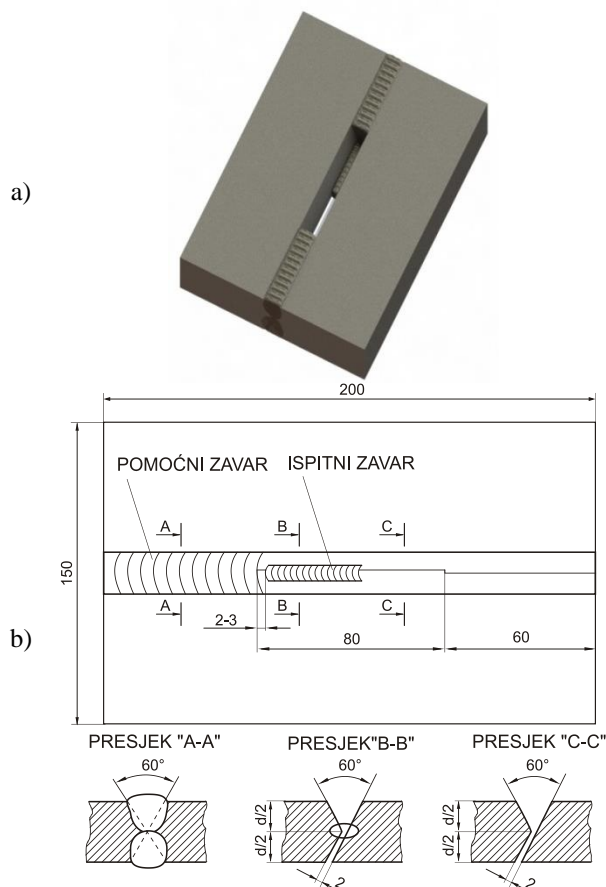
Slika 4. Dimenzije i oblik ispitne epruvete (implanta) za ispitivanje Implant probom
a) izgled zarezane epruvete b) stvarni izgled uzorka



Slika 5. Shematski prikaz Implant uzorka i potporne ploče

3.3. Ispitivanje zavarljivosti (sklonosti hladnim pukotinama) Tekken metodom

Tekken metoda primjenjuje se za ispitivanje sklonosti čelika nastanku hladnih pukotina uzimajući u obzir utjecaj osnovnog i dodatnog materijala, zavarivačkog toplinskog ciklusa, temperature predgrijavanja i sadržaja difundiranog vodika u zavarenom spoju. Oblik, priprema i dimenzije uzorka prikazani su na slici 6. Pri izvođenju zavarivanja na Tekken probi prvo se zavaruje pomoćni zavar s "X"- pripremom. Pri tome se mora paziti da kod "Y"- pripreme koja je u korijenu, ostane razmak 2 do 3 mm. Nakon zavarivanja pomoćnih zavara pristupa se izvođenju ispitnog zavara. Tijekom izvođenja zavarivanja registriraju se parametri zavarivanja. Ispitivanje Tekken - probe obavlja se 48 sati nakon zavarivanja. Nakon pregleda ispitnog zavara i registriranja eventualnih pukotina, iz ispitnog se zavara isijecaju uzorci za ispitivanje.



Slika 6. Epruveta za Tekken probu a) izgled zavarenog uzorka, b) priprema i dimenzije uzorka [6]

4. PLAN POKUSA

Za eksperimentalna istraživanja koja se obrazlažu odabrani su:

- mikrolegirani čelik povišene čvrstoće TStE 420,
- poboljšani visokočvrsti čelik S960QL
- poboljšani nelegirani ugljični čelik Ck 45
- poboljšani nisko legirani krom-molibdenski čelik 25 CrMo 4 i

Kemijski sastav i mehanička svojstva čelika TStE 420 prikazan je u tablicama 1 i 2., a čelika S960 QL u tablicama 3. i 4.

Tabela 1. Kemijski sastav materijala TStE 420

C	0,18
Si	0,3
Mn	1,47
P	0,017
S	0,005
Ni	0,22
N	0,016
Al	0,023
V	0,13
Cu	0,02

Tabela 2. Mehanička svojstva materijala TStE 420

Granica razvlačenja $R_{p0,2}$ / MPa		422
Vlačna čvrstoća R_m / MPa		577
Istezljivost A_5 / %		30
Kontrakcija Z / %		61,9
Savijanje α =180 °	longitudinalno	+
	transferzalno	+
Žilavost, K_V / J longitudinalno	na 20 °C	261
	na -20 °C	245
	na -40 °C	182

Tabela 3. Kemijski sastav materijala S960QL

C	0,17
Si	0,47
Mn	1,42
P	0,008
S	0,003
Cr	0,59
Mo	0,56
Ni	0,79
Nb	0,02
V	0,05
Cu	0,03
Ti	0,01

Tablica 4. Mehanička svojstva materijala S960QL

Granica razvlačenja $R_{p0,2}$ / MPa		1 020
Vlačna čvrstoća R_m / MPa		1 080
Istezljivost A_5 / %		19
Kontrakcija Z / %		61,9
Žilavost, K_V / J longitudinalno	na 0 °C	158
	na -20 °C	76
	na -40 °C	58

Kemijski sastav i mehanička svojstva čelika Ck45 prikazan je u tablicama 5 i 6., a čelika 25CrMo4 u tablicama 7 i 8.

Tabela 5. Kemijski sastav materijala Ck 45

C	0,45
Si	0,22
Mn	0,62
P	0,008
S	0,004

Tabela 6. Mehanička svojstva materijala Ck 45

Granica razvlačenja $R_{p0,2}$ / MPa		460
Vlačna čvrstoća R_m / MPa		694
Istezljivost A_5 / %		26,3
Kontrakcija Z / %		62,5
Žilavost, K_V / J longitudinalno	na 20 °C	30

Tabela 7. Kemijski sastav materijala 25CrMo4

C	0,25
Si	0,31
Mn	0,76
P	0,008
S	0,013
Cr	0,98
Mo	0,16
Ni	0,05

Tabela 8. Mehanička svojstva materijala 25CrMo4

Granica razvlačenja $R_{p0,2}$ / MPa		620
Vlačna čvrstoća R_m / MPa		810
Istezljivost A_5 / %		16
Kontrakcija Z / %		60,3
Žilavost, K_V / J longitudinalno	na 20 °C	95

U sklopu istraživanja provedeno je ispitivanje tvrdoće HV10 na pojedinim uzorcima, i to u skladu s preporukama dokumenta MIZ-a IX-1609-90, tangencijalnom metodom. Tangencijalnom metodom dobivaju se vrijednosti tvrdoće po presjeku zavarenog spoja za sve zone zavarenog spoja. Svi uzorci iz čelika Ck 45 i 25CrMo4 su izrezivani na tračnoj pili uz kontinuirano hlađenje, a poslije toga poravnati brusnim papirom i polirani. Tvrdoća čelika TStE 420 i S960QL ispitivana je na simuliranim uzorcima.

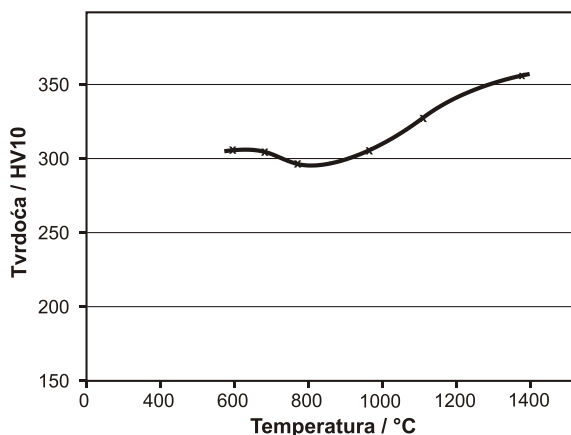
Također je ispitivana i udarna radnja loma i to na temperaturi 20 °C za sve čelike i za čelik TStE 420 na temperaturi -40 °C, a za čelik S960QL na temperaturi -50 °C.

5. REZULTATI ISTRAŽIVANJA

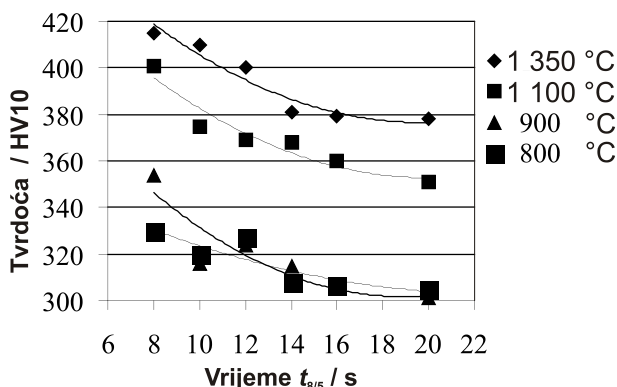
5.1. Rezultati ispitivanja tvrdoće

Nakon simuliranja toplinskog ciklusa zavarivanja u metalografskom laboratoriju, priređeni su uzorci za mjerenje tvrdoće HV10. Uzorci su nakon toga blago

nagriženi 3 % - tnom HNO_3 do razine da bi se pri povećanju kod mjerenja tvrdoće jasno vidjela linija staljivanja. Tvrdoća je mjerena na pet uzoraka za svaku temperaturu simuliranja u dva prolaza. Dobivene vrijednosti tvrdoća za čelik TStE 420 prikazane su na slici 7, a za čelik S960QL na slici 8.

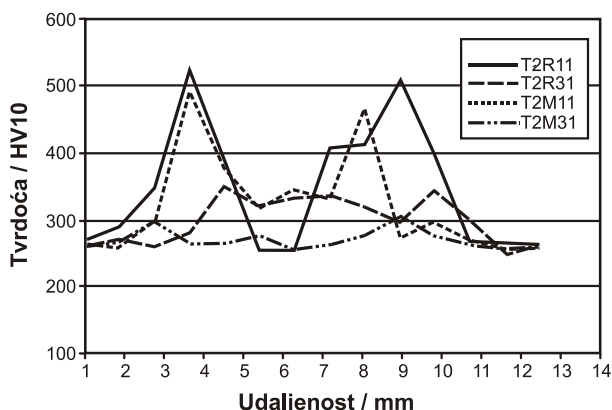


Slika 7. Ovisnost srednje vrijednosti tvrdoće od temperature simuliranja u dva prolaza (temperatura zagrijavanja 1350 °C - prvi prolaz i 600, 700, 780, 960, 1100 i 1350 °C - drugi prolaz)



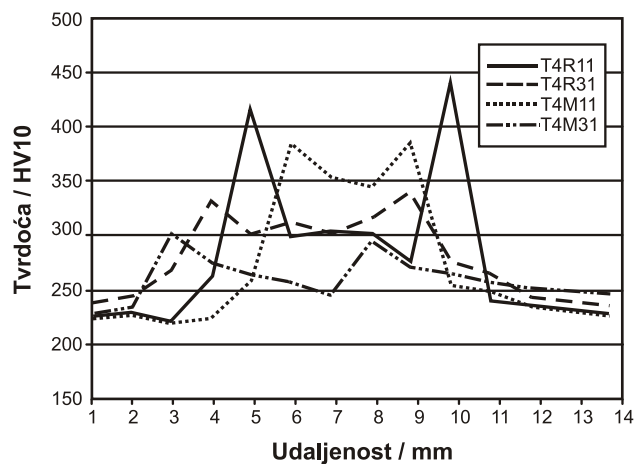
Slika 8. Dijagram vrijednosti tvrdoća u ovisnosti o temperaturi simuliranja i trajanju hlađenja $\Delta t_{8/5}$ (8, 10, 12, 14, 16 i 20s).

Rezultati mjerenje tvrdoće za uzorke iz čelika 25CrMo4 prikazani su na slici 9., a za uzorke iz čelika Ck 45 na slici 10..



Slika 9. Usporedba dijagrama tvrdoća pri različitim uvjetima zavarivanja čelika 25CrMo4: T2R11-

zavarivanje REL postupkom bez predgrijavanja; T2R31- zavarivanje REL postupkom s predgrijavanjem; T2M11- zavarivanje MAG postupkom bez predgrijavanja i T2M31- zavarivanje MAG postupkom s predgrijavanjem.



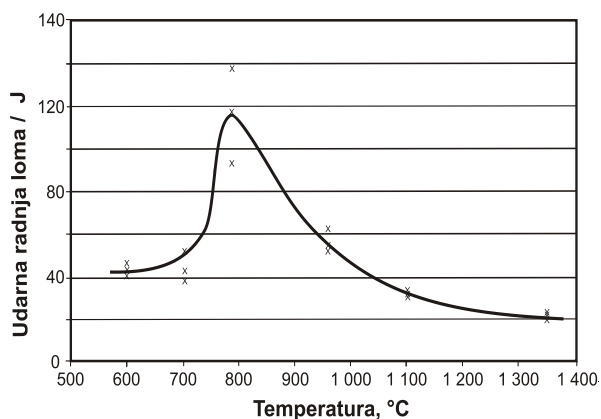
Slika 10. Usporedba dijagrama tvrdoća pri različitim uvjetima zavarivanja čelika Ck45: T4R11-zavarivanje REL postupkom bez predgrijavanja; T4R31-zavarivanje REL postupkom s predgrijavanjem; T4M11-zavarivanje MAG postupkom bez predgrijavanja i T4M31-zavarivanje MAG postupkom s predgrijavanjem.

Mjerenja tvrdoće HV10 tangencijalnom metodom na uzorcima Tekken proba od čelika 25 CrMo 4 na kojima su se pojavile hladne pukotine, pokazala su, da su maksimalne vrijednosti tvrdoće izmjerene u ZUT-u uz "liniju staljivanja" 440 do 530 HV10 (uzorci bez predgrijavanja). Na uzorcima kod kojih je provedeno predgrijavanje na 200 °C, maksimalne vrijednosti tvrdoće izmjerene u ZUT-u uz "liniju staljivanja" iznosile su 300 do 350 HV10, a na uzorcima Tekken proba nije bilo pukotina.

Identična mjerenja tvrdoće provedena su i na uzorcima Tekken proba čelika Ck 45. Na probama kod kojih je došlo do pojave hladnih pukotina izmjerene su maksimalne vrijednosti tvrdoće u ZUT-u uz "liniju staljivanja" 350 do 430 HV10 (uzorci bez predgrijavanja). Na uzorcima kod kojih je provedeno predgrijavanje na 300 °C, maksimalne vrijednosti tvrdoće izmjerene u ZUT-u uz "liniju staljivanja" iznosile su 300 do 330 HV10, te na uzorcima Tekken proba nije bilo pukotina.

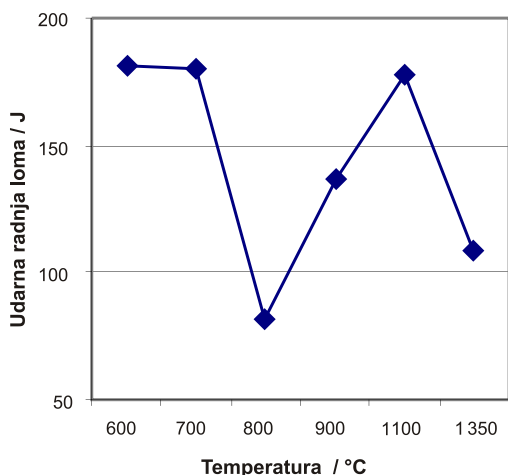
5.1. Rezultati ispitivanja udarne radnje loma

Udarne radnje loma na uzorcima zavarenim simuliranim ciklusom zavarivanja ispitivana je po Charpy-ju, na temperaturama 20 °C i -40 °C. Rezultati udarnih ispitivanja čelika TStE 420 na temperaturi 20 °C u ovisnosti od maksimalne temperature drugog ciklusa simuliranja prikazani su dijagramski na slici 11.



Slika 11. Dijagram ovisnosti udarne radnje loma o T_{max} drugog ciklusa simuliranja

Najviše vrijednosti udarne radnje loma su vezane za sitno feritno zrno kao rezultat maksimuma na temperaturi malo višoj od A_{c3} , a u prikazanom istraživanju ta temperatura je iznosila 780 °C. Iznad ove temperature dolazi do smanjenja udarne radnje loma. Osim toga maksimum udarne radnje loma na 780 °C smanjuje tvrdoću. Daljnjim povećanjem temperature dolazi do pada udarne radnje loma (slika 11), što je uvjetovano porastom tvrdoće (dijagram na slici 7) [7]. Rezultati udarnih ispitivanja čelika S960QL na temperaturi 20 °C u ovisnosti od maksimalne temperature drugog ciklusa simuliranja prikazani su dijagramski na slici 12.



Slika 12. Dijagram ovisnosti udarne radnje loma o T_{max} drugog ciklusa simuliranja

Najviše vrijednosti udarne radnje loma vezane su za popušteno martenzitno zrno uz manji udio bainita, što je uvjetovano tvrdoćama od 370 do 380 HV (slika 8).

6. ZAKLJUČAK

U radu se obrazlaže problematika ispitivanja zavarljivosti čelika. Poseban se osvrt daje na indirektnu i direktnu metode ispitivanja zavarljivosti čelika povišene i visoke čvrstoće, te čelika za poboljšavanje.

Mikrolegirani čelik povišene čvrstoće TStE 420 treba zavarivati takvim parametrima da sa postigne vrijeme hlađenja 800 do 500 °C od 8 do 10 s. Pri ovakovim

parametrima tvrdoća u ZUT-u uz liniju staljivanja materijala nije maksimalna, dok su vrijednosti udarne radnje loma veće od granične vrijednosti prijelaza u krhko stanje. Rezultati ispitivanja toplinskim simuliranjem dvoprolaznog ZUT-a pokazuju u kojem se pravcu treba orijentirati s obzirom na parametre realnog zavarivanja čelika TStE 420.

Tehnologija zavarivanja čelika S960QL se temelji na kontroliranom unosu energije tijekom zavarivanja (predgrijavanje, temperatura između prolaza, toplinski input ostvaren pomoću električnog luka, dogrijavanje) i strogo pridržavanju propisanih aktivnosti, a sve u cilju izbjegavanja hladnih pukotina i ostalih grešaka u izradi, te postizanja zahtijevanih svojstava zavarenog spoja. Premali unos topline najčešće utječe na povećanje čvrstoće i tvrdoće zavarenog spoja, što uz zaostala naprezanja i nazočnost vodika u zavaru, može uzrokovati pukotine, a uz to smanjuje deformabilnost i povećava sklonost krhkom lomu. [7].

Provedena istraživanja zavarljivosti legiranog krom-molibdenskog čelika 25 CrMo 4 i nelegiranog ugljičnog čelika Ck 45 pokazala su da su ti čelici skloni prema nastajanju hladnih pukotina, odnosno da je za ostvarivanje kvalitetnog zavarenog spoja kod ovih čelika nužno smanjiti utjecaje čimbenika koji dovode do nastajanja hladnih pukotina.

Na osnovi provedenih eksperimentalnih istraživanja Implant i Tekken metodom, potvrđena je temperatura predgrijavanja za čelik 25CrMo4, debljine 20 mm - $T_p=200$ °C, a za čelik Ck 45 debljine 20 mm - $T_p=300$ °C. Iako su kod temperature predgrijavanja na 200 °C za čelik 25 CrMo 4, a na 300 °C za čelik Ck 45 rezultati zadovoljili kod toplinskog inputa u intervalu od 12 do 20 kJ/cm, preporuča se držanje gornje granice vrijednosti za toplinski input, jer se na taj način postiže sporije hlađenje zavarenog spoja (više vremena za efuziju vodika iz zavarenog spoja). Efuziju vodika iz zavarenog spoja pospješuje i viša vrijednost temperature predgrijavanja.

Nedostatak ispitivanja toplinskog ciklusa zavarivanja jeste mogućnost odstupanja parametara simuliranog procesa od stvarnih parametara pri zavarivanju. Pri simulaciji toplinskog ciklusa zavarivanja maksimalna temperatura ciklusa je niža od maksimalne temperature u ZUT-u, praktički ona se približava temperaturi likvidusa osnovnog materijala, a simuliranje također onemogućava utvrđivanje utjecaja metala zavara na svojstva ZUT-a. Pored navedenih nedostataka dugogodišnja ispitivanja simuliranjem toplinskog zavarivačkog ciklusa su pokazala da se mogu s velikom sigurnošću utvrditi zakonitosti ponašanja određenog materijala pri zavarivanju.

7. LITERATURA

- [1] Dunder, M.: Određivanje parametara zavarivanja čelika za poboljšavanje. Magistarski rad, Fakultet Strojstva i brodogradnje, Zagreb, 1997.
- [2] Dunder, M.; Vuherer, T.; Kladarić, I.: Weldability investigation of TStE 420 after weld thermal cycle simulation, Journal Strojstvo 52 (2) 2010; 97-104 UDK 621.791.4: 539.42: 669.14.018.292.

- [3] EN 10025:2004 The European standard for structural steel
- [4] Semjan, V. i dr.: Teorija zavarljivosti čelika, Energoinvest, Institut za zavarivanje, Sarajevo, 1989.
- [5] Dunder, M.; Vuherer T.; Samardžić, I.: Ispitivanje zavarljivosti simulacijom toplinskog ciklusa zavarivanja// Prof. dr. sc. Z. Kožuh (ur.). Šibenik : Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja, 2014. 195-204.
- [6] Dunder, M.; Samardžić, I.; Marić, D.; Putnik, I.: Proceedings of CIM 2011 Approach to weldability investigation of quenched and tempered steels // Computer integrated manufacturing and high speed machining / Abele, Eberhard ; Udiljak, Toma ; Ciglar, Damir (ur.). Zagreb : Croatian Academy of Engineering., 2011. 93-98.
- [7] Dunder, M.; Samardžić, I; Vuherer, T.: Weldability of microalloyed high strength steels TStE420 and S960QL // Metalurgija. 53 (2014) , 3; 335-338

Kontakt autora:**Dunder Marko, prof. dr.sc., EWE**

Sveučilište u Rijeci, Odsjek za politehniku

Goran Salopek, asistent

Sveučilište u Rijeci, Odsjek za politehniku

Marko Horvat, dipl. ing.

Sveučilište Sjever

Veljko Kondić, mag. ing. mech.

Sveučilište Sjever

Matija Marković, student

Sveučilište u Rijeci, Odsjek za politehniku